

控制系统理论及应用

王 枏 编著

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 简 介

控制系统理论内容丰富,本书以加强基础、突出重点、注重应用为原则,主要介绍线性系统的基本理论及其应用、控制系统的不确定性与鲁棒性分析、多变量协调控制、最优控制与随机最优估计等内容。在介绍有关基本概念时,力求在保持理论严密性的的前提下,尽可能从工程实例来引入重要的概念和方法,使读者能较快地掌握控制系统理论的基本内容,为今后深入学习本学科的其他分支学科打好基础。

本书作为控制理论与控制工程专业本科生或研究生的教材或教学参考书,亦可作为相关领域科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

控制系统理论及应用/王枏编著.—北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-0927-5

I. 控... II. 王... III. 控制系统理论 IV. O231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 092829 号

书 名:控制系统理论及应用

编 著:王枏

责任编辑:李欣一

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)

邮编:100876 电话:62282185 62283578

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市忠信诚胶印厂

印 数:1—3 000 册

开 本:787 mm×1 092 mm

印 张:23.75

字 数:518 千字

版 次:2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0927-5 /TN·342

定 价:33.00 元

·如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系·

序

控制系统理论的产生源于自动化工程实践的需要,而控制系统理论的发展又用于自动化系统的分析、设计和技术实现。

当前,控制系统理论及应用的发展动向如下:

1. 智能控制系统理论及应用

智能自动化工程实践的需要及人工智能、神经网络、模式识别等方法与技术的进展,促进了智能控制系统理论及应用的发展。

2. 大系统、巨系统控制理论及应用

管控一体化的综合自动化工程实践的需要及计算机网络和通信技术的进展,促进了大系统、巨系统控制理论及应用发展。

3. 基于广义模型的控制系统理论及应用

基于传统数学模型的控制系统理论的局限性及实际自动化工程系统的复杂性,需要发展基于广义模型(如知识模型、网络模型等)的控制系统理论及应用。

4. 非工程领域控制系统理论及应用

由于社会经济、生物生态、气象环境等非工程领域的管理、控制、分析、预测的需要,促进了非工程控制系统理论及应用的发展。

北京邮电大学王枏教授根据教学任务的需要,在科研工作实践基础上,编著了《控制系统理论及应用》,这是一本注重控制原理的物理意义与工程应用,面向教学实践,理论联系实际的好书。相信其出版将为控制系统理论及应用的发展作出积极的贡献。

涂序彦

2004年5月6日

前 言

控制系统理论的产生源于自动化工程实践的需要,并在机械、交通、武器、飞行器等各种系统中发挥不可替代的作用。20 世纪中叶以来,随着信息技术的迅速发展和广泛应用,随着物质经济向信息经济的迅速转型,随着信息化的进程不断深化,信息网络正在成为现代社会最为重要的基础结构,成为信息时代人类社会赖以生存和发展的命脉源泉。这就要求自动控制专业和信息类专业人才必须掌握控制系统理论与技术。

本教材是自动控制等专业本科生和研究生学习《现代控制理论》课程时的教科书,参考教学时数为 40~60 学时。本着加强基础、突出重点、注重应用的原则,本书以线性系统理论和最优控制与估计为主要内容。线性系统部分介绍了状态空间表达式的建立与求解、标准型、可控性与可观测性分析、稳定性与鲁棒性分析、结构分解、状态反馈与状态观测器设计、解耦控制、协调控制,最优控制与最优估计部分介绍了经典变分法求解最优控制问题、最小值原理及应用、随机系统及基本估计方法的基本方程等。

大规模信息网络是一类典型的“开放的复杂的大系统”。而且,随着技术的进步和社会的发展,信息网络的规模将进一步扩大,网络的技术将更加复杂,网络的服务也必将越来越多样。为了保证大规模信息网络高效可靠地运行,网络的管理与控制就成为头等重要的任务。大规模信息网络的管理与控制,需要大系统控制理论和智能控制理论的支持,控制系统理论是今后深入学习这些理论的基础。此外,信息系统的其他方面自动控制、智能控制与管理的需求也越来越迫切。因此,社会的发展对控制系统理论与技术人才提出了越来越迫切的需求,为自动控制的人才提供了广阔的驰骋天地。

鉴于控制系统理论数学推证多,概念抽象,有些内容学生不易理解,本教材在介绍有关基本概念时,力求在保证理论严密性的前提下,尽可能从概念上加以阐述,注意与经典控制理论的衔接与对照,并配有合适的例题与习题。使学生能较快地掌握控制系统理论中的最基本内容。另外,本书对某些较难的非基本内容以模块形式出现作为选学内容,有利于教师根据实际情况,在不打乱全书系统性的情况下,灵活处理。

在本教材中,参考和吸收了一些兄弟院校教材的部分内容,在此对这些教材的单位、作者谨致真诚的感谢。另外,要特别感谢涂序彦教授,承蒙涂序彦教授厚爱,在百忙之中抽出宝贵的时间对本教材提出了许多建设性的修改和指导意见。

在本教材的编写过程中,胡航先、罗鑫、陈翔、杨君、刘建毅、张鹏飞提出许多宝贵意

见,并参与校核。在此表示诚挚的感谢。

本书的写作获得国家 836 计划重大项目(2001AA114210-14 和 2002AA117010-07)的资助。

由于编者的水平有限,加上编写时间仓促,因此书中可能存在不妥甚至错误之处,恳请广大读者和专家予以批评和指正,以便进一步修订和完善。

编 者

2004 年 5 月于北京

目 录

绪 论.....	1
第 1 章 控制系统的数学模型	
1.1 控制系统的运动方程	7
1.1.1 动力学系统	7
1.1.2 描述运动的微分方程	8
1.1.3 非线性方程的线性化	9
1.1.4 离散时间运动方程.....	11
1.2 线性微分方程的解.....	12
1.2.1 线性微分方程的标准解.....	13
1.2.2 线性微分方程的拉氏变换解	17
1.2.3 运动的模态.....	18
1.3 控制系统的传递函数.....	21
1.3.1 传递函数.....	21
1.3.2 系统结构图.....	24
1.3.3 传递函数极点与零点的相消.....	26
1.4 控制系统的状态空间描述.....	31
1.4.1 状态空间的基本概念	31
1.4.2 状态空间表达式.....	34
1.4.3 由系统微分方程建立状态空间表达式.....	37
1.4.4 系统传递函数与状态空间表达式的互换.....	44
1.4.5 多输入多输出系统的状态空间表达式.....	49
1.4.6 组合系统的状态空间表达式	50
1.4.7 离散系统的状态空间表达式	54
1.5 系统状态空间表达式的解.....	62
1.5.1 矩阵指数函数	62
1.5.2 状态转移矩阵	67
1.5.3 状态方程的解	75
1.5.4 系统特征值与模态的不变性	89
习 题	93

第 2 章 线性控制系统的结构分析

2.1	特征值标准型.....	98
2.1.1	状态空间的等价变换.....	99
2.1.2	系统的特征值和特征向量	100
2.1.3	对角线标准型	102
2.1.4	约当标准型	105
2.1.5	模态标准型	114
2.2	状态可控性	117
2.2.1	状态可控性定义	118
2.2.2	状态可控性判据	120
2.3	状态可观性	130
2.3.1	状态可观性定义	131
2.3.2	状态可观性判据	132
2.4	状态可控性与可观性的对偶原理	138
2.5	状态可控标准型和可观标准型	140
2.6	线性系统的结构分解	146
2.6.1	按可控性分解	147
2.6.2	按可观性分解	149
2.6.3	按可控性和可观性分解	152
2.7	状态可控性可观性与传递函数矩阵	155
2.7.1	单输入单输出系统的零极相消	155
2.7.2	多输入多输出系统的零极相消	158
2.7.3	状态可控性和可观性的频域判据	159
2.7.4	输出可控性	160
2.8	传递函数矩阵的实现	160
2.8.1	实现和最小实现	161
2.8.2	标量传递函数的实现	162
2.8.3	传递函数矩阵的实现	164
	习 题.....	166

第 3 章 控制系统的稳定性与鲁棒性分析

3.1	李雅普诺夫关于稳定性的定义	174
3.1.1	运动稳定性及平衡状态	174
3.1.2	稳定性的几个定义	175

3.2	李雅普诺夫第一法	177
3.2.1	线性系统的稳定性	178
3.2.2	非线性系统的稳定性	178
3.3	李雅普诺夫第二法	180
3.3.1	预备知识	181
3.3.2	几个稳定性判据	183
3.3.3	对李雅普诺夫函数的讨论	187
3.4	李雅普诺夫方法在线性系统中的应用	188
3.4.1	线性定常连续系统渐近稳定判据	188
3.4.2	线性时变连续系统渐近稳定判据	191
3.4.3	线性定常离散时间系统渐近稳定判据	192
3.4.4	线性时变离散系统渐近稳定判据	193
3.4.5	系统响应的快速性指标	194
3.4.6	参数的最优化设计	196
3.4.7	状态反馈的设计	199
3.5	李雅普诺夫方法在非线性系统中的应用	199
3.5.1	雅可比矩阵法	200
3.5.2	变量梯度法	202
3.6	系统不确定性与鲁棒性	208
3.6.1	不确定模型	210
3.6.2	鲁棒稳定性	215
3.6.3	鲁棒性能	222
	习 题	225
第 4 章	线性定常系统的综合	
4.1	线性反馈控制系统	228
4.1.1	状态反馈	228
4.1.2	输出反馈	229
4.1.3	从输出到状态向量导数 \dot{x} 反馈	230
4.1.4	动态补偿器	231
4.1.5	闭环系统的可控性与可观性	232
4.2	闭环系统的极点配置	234
4.2.1	采用状态反馈	234
4.2.2	采用输出反馈	239
4.2.3	系统镇定问题	239

4.3	系统解耦问题	243
4.3.1	前馈补偿器解耦	244
4.3.2	状态反馈解耦	245
4.4	多变量协调控制	251
4.4.1	协调控制原则	252
4.4.2	协调控制系统分析	253
4.4.3	协调控制系统综合	257
4.4.4	协调控制原则的应用	261
4.5	状态重构	264
4.5.1	状态观测器定义	265
4.5.2	状态观测器的存在性	265
4.5.3	状态观测器的实现	267
4.5.4	降维观测器	268
4.6	带有状态观测器的反馈控制系统	274
4.6.1	系统的结构与状态空间表达式	274
4.6.2	闭环系统的基本特征	275
4.6.3	状态反馈系统与输出反馈系统	277
4.7	有外扰时控制系统的综合	278
4.7.1	调节器问题	279
4.7.2	闭环系统实现静态无差的判据	282
4.7.3	外扰状态可直接测量时的综合	284
4.7.4	外扰状态观测器和内模原理	289
4.8	鲁棒调节器	292
4.8.1	常值扰动下的鲁棒调节器	293
4.8.2	鲁棒调节器的频域性质	297
4.8.3	鲁棒调节器的构造	299
	习 题.....	303
第 5 章 最优控制与最优估计		
5.1	最优控制的数学描述	311
5.1.1	最优控制问题的实例	312
5.1.2	最优控制问题的基本概念	316
5.2	变分法及其在最优控制中的应用	319
5.2.1	泛函与变分的基本概念	319
5.2.2	泛函极值条件	324

5.2.3 应用变分法求解最优控制问题	330
5.3 极小值原理及应用	337
5.3.1 基本原理	337
5.3.2 Bang-Bang 控制	340
5.3.3 双积分系统的时间最优控制	341
5.4 随机系统及基本估计方法	346
5.4.1 随机系统的基础知识	347
5.4.2 最小方差估计与线性最小方差估计	349
5.4.3 极大似然法估计与极大验后法估计	351
5.4.4 最小二乘法估计与加权最小二乘法估计	355
5.4.5 递推最小二乘法估计	360
习 题.....	363
参考文献.....	368

绪 论

控制系统用来控制某些物理量按照预定或期望的规律变化。随着科学技术的发展,控制系统理论与技术显得越来越重要。它不但在现代工程技术领域中获得广泛的应用,而且在经济学、生物学和医学领域中也受到了很大的重视。

控制系统理论作为一门新兴的科学普遍应用于国民经济的多个方面,包括各种自动控制系统、各类机器人、各种形式的自动机构,以及进行信息采集、信息处理、加工控制、管理、决策的各种自动化装置和系统。它不仅把人类从繁重的体力与部分脑力劳动中解放出来,而且可以完成只靠人类的自身所无法完成的许多精密、复杂的工作。在许多危险以及特殊的环境中,更是少不了自动化装置。

控制系统理论主要研究系统中信息互相作用的规律以及如何利用这些规律对系统进行设计、控制、决策和管理,研究如何改进动态系统的性能以达到所需目标,这个广义定义涉及人类活动的许多方面。控制系统理论试图以定量方式描绘这些问题,并力图寻求一些精确的数学描述方法。

控制系统理论的研究目标是了解基本控制原理,建立数学模型用于分析控制系统的性能,设计自动控制系统。控制系统理论不仅用于处理简单的动态系统,还用于处理具有不确定性的复杂动态系统。

1. 控制系统理论的产生与发展

理论归根结底是从实践发展而来的,它来之于实践,但又反过来指导实践。控制系统理论的发展又一次说明了这一真理。控制系统理论的发展形成了经典控制理论和现代控制理论两大分支。

人类发明具有“自动”功能的装置的历史,可以追溯到公元前 14~前 11 世纪在中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶。公元前 4 世纪,希腊柏拉图首先使用了“控制论”一词,公元 235 中国(三国时期)的马均及公元 477 年祖冲之等制造的具有开环控制特点的指南车,并发明了齿轮及差动齿轮机。具有反馈控制原理的控制装置最有代表性的例子当属古代的计时器“水钟”(在中国叫做“刻漏”,也叫“漏壶”)。北宋时期,苏颂等于 1086~1090 年在开封建成“水运仪象台”。仪象台上的浑仪附有窥管,能够相当准确地跟踪天体的运行,“使它自动地保持在窥管的视场中”。这种仪象台的动力装置中就利用了“从定水位漏壶中流出的水,并由擒纵器(天关、天锁)加以控制”。但比较自觉运用反馈原理设计并成功应用的是英国的瓦特于 1788 年发明的蒸汽机用的离心式飞锤调速器。后来,英国学者麦克斯韦于 1868 年发表了《论调速器》一文,对它的稳定性进行了分析,指出控制系统的品质可用微分方程来描述,系统的稳定性可用特征方程根的位置和形式来研究。1875 年英国的劳斯和 1895 年德国的赫尔维茨先后提出了根据代数方程系数判别系统稳

定性的准则。1892年俄国学者李雅普诺夫出版了专著《论运动稳定性的一般问题》,提出了用李雅普诺夫函数(一种能量函数)的正定性及其导数的负定性判别系统稳定性的准则,从而建立了动力学系统的一般稳定性理论。

20世纪20年代电子技术的迅速发展,促进了信息处理和控制系统技术及其理论的发展。马克斯威尔对装有调速器的蒸汽机系统动态特性的分析、马诺斯基对船舶驾驶控制的研究都是控制系统理论的开拓性工作。1932年美籍瑞典科学家奈奎斯特对单回路反馈系统的研究表明,反馈控制即使在系统情况知之不多的条件下也可以得到较好的性能,提出了根据频率响应判断反馈系统稳定性的准则,即奈奎斯特判据。1938年,前苏联学者米哈依洛夫提出用图解分析方法判别系统稳定性的准则,把奈奎斯特判据推广到条件稳定和开环不稳定系统的一般情况。

20世纪40年代,美国著名科学家维纳对控制系统理论作出了创造性的贡献。1948年维纳出版了专著《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》,系统地论述了控制系统理论的一般原理和方法,推广了反馈的概念,为控制理论的发展奠定了基础。该书的出版标志控制学科的诞生,他的控制论概念提供了一个可以把控制问题和通讯问题统一考虑的框架。他同时也发展了在有噪声的情况下信号的滤波、预报和平滑的方法。其后的研究又利用了当时刚提出的平稳随机过程,最后建立了信息的“伯德-申农”概念。

1945年美国的伯德出版了《网络分析和反馈放大器设计》一书,提出了频率响应分析方法,即简便而实用的“伯德图”法。1948年埃文斯提出了直观而简便的图解分析法——根轨迹法,在控制系统工程上得到了广泛应用。

这一时期,经典控制理论主要是解决单变量控制系统的分析与设计,研究的对象主要是线性定常系统。它以拉氏变换为数学工具,采用以传递函数、频率特性、根轨迹等为基础的古典频域方法研究系统。对于非线性系统,除了线性化及渐近展开计算以外,主要采用相平面分析和谐波平衡法(描述函数法)研究。

经典控制理论能够较好地解决单输入单输出反馈控制系统的问题,但它具有明显的局限性,突出的是难以有效地应用于时变系统和多变量系统,也难以揭示系统更为深刻的特性。

20世纪50年代后期到60年代初期是控制系统理论发展的转折时期。这个时期由于计算机技术、航空航天技术的迅速发展,控制系统理论有了重大的突破和创新。它所研究的对象不再局限于单变量的、线性的、定常的、连续的系统,而扩展为多变量的、非线性的、时变的、离散的系统。现代控制理论以线性代数和微分方程为主要数学工具,以状态空间法为基础,分析和设计控制系统。

华尔德的序贯分析和贝尔曼的动态规划是转折时期的开端。1956年美国的贝尔曼发表了《动态规划理论在控制过程中的应用》一文,提出了寻求最优控制的“动态规划”法。1958年,美籍匈牙利人卡尔曼提出递推估计的自动优化控制原理,奠定了自校正控制器的基础。1960年,他发表了《控制系统的一般理论》等论文,引入状态空间法分析系统,提

出可控性、可观性、最优调节器和卡尔曼滤波等概念。两年后,卡尔曼等人又提出最优控制反馈问题,并得到若干有关鲁棒性的结果。这些理论受到最优统计决策和资源分配中的序贯规划问题研究的激发。它们在概念上的贡献是考虑一大类以初始状态参数化的动态优化问题。这个理论的中心问题是建立最优性能的动态规划方法,从它的解就可以确定最优反馈控制规律。与此同时,优化领域中另一个长期被忽视的强调不等式约束的线性和非线性规划也开始得到发展,从而构建了现代控制理论的框架。

在现代控制理论发展的同一时期,与现代控制理论密切相关的科学也同时发展起来。

1954年,我国著名科学家钱学森在美国出版《工程控制论》一书,书中所阐明的基本理论和观点奠定了工程控制论的基础。

1960年,在第一届国际自动控制联合会 IFAC 世界大会上,我国学者涂序彦提出了多变量协调控制理论。

1961年,苏联的庞特里亚金的《最优过程的数学理论》一书正式出版,证明了极大值原理,使得最优控制理论得到很大发展。极大值原理的最大贡献是20世纪50~60年代对于大量轨迹优化数值计算方法的研究的推进。其研究成果是许多空间载运器的成功的设计,其中包括阿波罗计划和宇航飞行计划。

1967年瑞典学者阿斯特勒姆提出最小二乘辨识,解决了线性定常系统的参数估计问题和定阶方法,他和法国的朗道教授等人在自适应控制理论和应用方面做出了贡献。

1970年,英国学者罗森布罗克等人提出多变量频域控制理论,丰富了现代控制理论领域。

从20世纪60年代末开始,控制系统理论更进一步地进入了一个多样化发展的时期。它不仅涉及系统辨识和建模、统计估计和滤波、最优控制、鲁棒控制、自适应控制、智能控制及控制系统CAD等理论和方法。同时,它与社会经济、环境生态、组织管理等决策活动,与生物医学中诊断及控制,与信号处理、软计算等邻近学科相交叉中又形成了许多新的研究分支。

20世纪70年代以来形成的大系统理论主要解决大型工程和社会经济系统中信息处理、可靠性控制等综合优化的设计问题。由于应用范围涉及越来越复杂的工程系统和社会、经济、管理等非工程的人类活动系统,原有的理论方法遇到了本质困难,大系统理论的发展逐渐转向“复杂系统”概念。钱学森把系统的研究拓广到“开放的复杂巨系统”范畴,于1990年提出“从定性到定量的综合集成法”的处理开放的复杂巨系统的研究方法。1994年涂序彦出版了《大系统控制论》一书,在大系统理论与人工智能相结合的基础上,建立了“大系统论”的新分支。

智能控制的发展始于20世纪60年代,它是一种能更好地模仿人类智能的、非传统的控制法。它突破了传统的控制中对象有明确的数学描述和控制目标是可以数量化的限制。它所采用的理论方法主要来自控制系统理论、人工智能、模糊集和神经网络以及运筹学等科分支,主要代表人物有美国扎德,他于1965年创立了模糊集合论,为解决复杂系统

的控制提供了新的数学工具。1968年,美籍华人傅京孙和桑托斯等人提出用模糊神经元概念研究复杂大系统行为,正式提出了智能控制就是人工智能技术与控制理论的交叉,并创立了人机交互式分级递阶智能控制的系统结构。

控制系统理论和社会生产及科学技术的发展密切相关,在近代得到极其迅速的发展。它不仅已经成功地运用并渗透到工农业生产、科学技术、军事、生物医学、社会经济及人类生活等诸多领域,而且在这过程中控制系统理论也发展成为一门内涵极为丰富的新兴学科。

随着经济和科学技术的迅猛发展,控制系统理论与许多学科相互交叉、渗透融合的趋势在进一步加强,控制系统理论的应用范围在不断扩大,控制系统理论在认识事物运动的客观规律和改造世界中将得到进一步的发展和完善。

2. 控制系统理论的基本内容

控制系统理论包括传统控制理论(常被称为经典控制理论)与状态空间控制理论(常被称为现代控制理论),两者的数学描述工具,如微分方程、复变函数、矩阵和向量有内在联系,但解决工程技术问题时,在历史发展过程中形成了两套系统方法。本教材主要讨论状态空间控制理论,但也吸收了传统控制理论描述动力学系统的一些方法,使学生对控制系统理论有一个统一的了解。

状态空间控制理论是对系统的状态进行分析和综合及建模的理论,其主要内容如下:

(1) 线性系统理论

线性系统理论是状态空间控制理论中最基本的组成部分,也是现代控制理论中理论最完善、技术上较成熟、应用也最广泛的部分。它主要研究线性系统在输入作用下状态运动过程的规律和改变这些规律的可能性与措施;建立和揭示系统的结构性质、动态行为和性能之间的关系。系统的状态不但描述了系统的输入输出关系,而且描述了系统内部状态随时间变化的关系。线性系统理论主要包括系统的状态空间描述、可控性、可观测性和稳定性分析,状态反馈、状态观测器及补偿的理论和设计方法等内容,这些方法研究由状态变量构成的状态空间中对状态轨线的作用。

(2) 最优控制与鲁棒控制

最优控制与鲁棒控制是现代控制理论中的重要组成部分。最优控制问题是在给定限制条件和性能指标(即评价函数或目标函数)下,寻求一个最优控制向量使系统性能指标满足某种最佳准则或使某一指标泛函达到最优值的控制规律问题。解决最优控制问题的方法有变分法、庞特里亚金的极大值原理和贝尔曼的动态规划法,用各种“广义”梯度描述的优化算法,以及动态规划的哈密顿-雅可比-贝尔曼方程求解的新方法正在形成,并用于非线性系统的优化控制。

鲁棒控制理论研究控制系统中的参数发生摄动时使系统保持正常工作的特性和属性的控制规律。

在实际工程中要想得到精确的数学模型是一件困难的事情,因此我们在建立控制系

统的数学模型时,需要做合理的近似处理,而忽略一些不确定性因素,诸如参数误差、未建模动态、观测噪声以及不确定性的外界干扰等等,然而这些不确定性的存在可能会引起控制系统品质的恶化,甚至成为系统不稳定的原因。鲁棒控制就是针对这种不确定性而提出来的系统控制理论。它在设计控制器时不仅考虑数学模型的标称参数,同时还考虑不确定性对系统性能的最坏影响,使得所设计的控制器在不确定性对系统品质的破坏最严重时也能够满足设计要求。

鲁棒控制器就是基于这些不确定性的描述参数和标称系统的数学模型设计的。一般来说,鲁棒控制是比较保守的控制策略。即,对于所考虑集合内的个别元素,该系统并不是最佳控制。但是,它能以固定的控制器,保证在不确定性破坏最严重的情况下系统也能满足设计要求,而这正是实际现场所期望的,也是近几年对鲁棒控制的研究非常活跃的一个重要原因。

(3) 随机最佳估计

随机最佳估计亦称为最优滤波理论,是现代控制理论中重要的分支。当系统受到环境噪声或负载干扰时,其不确定性可以用概率和统计的方法进行描述和处理。也就是在系统数学模型已经建立的基础上,利用被噪声等污染的系统输入输出的测量数据,通过统计方法获得有用信号的最优估计。在通信工程中,接收到的信号总是由有用信号和干扰噪声混合组成的,从接收信号中分离出有用信号,就要用到最佳估计。为了实现随机系统的最优控制,首先要求出系统状态的最佳估计。经典的维纳滤波理论阐述的是对平稳随机过程按均方意义的最佳滤波,而现代的卡尔曼滤波理论用状态空间法设计最佳滤波器,克服了前者的局限性,适用于非平稳过程并在很多领域中得到广泛应用,成为现代控制理论的基石。

(4) 建模和系统辨识

建模和系统辨识是现代控制理论中很活跃的分支。要研究系统的状态,首先要建立动态系统在状态空间的模型,使其能正确反映系统输入、输出之间的基本关系,是对系统进行分析和控制的出发点。由于系统比较复杂,往往不能通过解析的方法直接建模,而主要在系统输入输出的试验数据或运行数据的基础上,从一类给定的模型中确定一个与被研究系统本质特征等价的模型。系统辨识包括结构辨识和参数辨识两大部分,如果模型的结构已经确定,只需确定其参数,称为部分辨识问题或参数估计问题或灰箱问题。若模型的结构和参数需同时确定,就是完全辨识问题或黑箱问题。

(5) 自适应控制

自适应控制是现代控制理论中近十年来发展较快的一个活跃的分支。所谓自适应控制,是随辨识系统的数学模型并按照当前的模型去修改最优控制律。当被控对象的内部结构和参数以及外部的环境特性和扰动存在不确定时,系统自身能在线观测和处理有关信息,相应地在线修改控制器的结构和参数,以保持系统所要求的最佳性能。自适应控制的两大基本类型是模型参考自适应和自校正控制。近期自适应理论的发展包括广义预测

控制、万用镇定器机理、鲁棒稳定的自适应系统以及引入了人工智能技术的自适应控制等。

控制系统理论除了以上几大部分外,还有分布参数系统理论、微分对策理论、大系统理论及可靠性理论等。新近发展起来的智能控制和鲁棒控制以及离散事件系统理论,表现出很强的生命力。随着科学技术的发展和学科的相互渗透,会不断地提出新的控制系统问题,产生新的控制系统理论。

3. 本教程研究范围

控制系统理论的内容极其丰富,但是作为自动化专业及信息类专业的本科生和研究生开设的课程,其目的是使学生掌握基本的理论和方法,为今后深入学习本学科的其他分支学科打好基础。本着加强基础、突出重点、注重应用的原则,考虑到可控性、可观性概念的提出,庞德里亚金的最小值原理的创立,以及卡尔曼滤波器的出现,是控制系统理论进入现代控制理论阶段的三大标志,控制系统的鲁棒性研究和协调控制研究是现代控制理论中一个非常活跃的领域,本教程以介绍线性系统的基本理论及其应用、控制系统的确定性与鲁棒性分析、多变量协调控制最优控制与随机最优估计为主要内容。鉴于控制系统理论数学推证多,概念抽象,有些内容学生不易理解,本教材在介绍有关基本概念时,力求在保持理论严密性的的前提下,尽可能从工程实例引入某些重要的概念和方法,并配有适当的例题与习题,使学生能较快地掌握控制系统理论的最基本内容。

第 1 章 控制系统的数学模型

描述系统中各种物理量之间的相互作用关系和各自的变化规律的表达式构成系统的数学模型。这些数学模型可按其输入、输出变量个数分为单变量系统或多变量系统,按随时间变化取值方式分为连续系统或离散系统,按随机因素的加入与否分为随机系统或确定系统,按所含非线性因素的性质分为线性系统或非线性系统,按对象参数变化情况分为时变系统或定常系统,还可按对对象的认知程度,划分为不确定性系统或确定性系统。

控制系统理论所研究的主要问题是分析一个给定系统的性质和特征以及设计一个系统使其具有给定的性质和特征,即如何根据实际对象建立适当的数学模型,如何根据这些数学模型分析系统的特征,又如何合理地设计出控制策略或控制器来达到控制目的。

1.1 控制系统的运动方程

凡是由一些对象相互作用、相互制约组成一个具有一定运动规律的整体,就称为系统。一个抽象系统可定义为一种数学过程。系统的概念既适用于简单的力学及电学装置,又适用于深奥复杂的系统。

被控对象与控制器组成一个控制系统。从被控对象获取信息,反过来又把调节被控制量的作用反馈给被控对象的控制法称为反馈控制。信息的传递途径是一个自身闭合的环,称为闭环,反馈控制总是通过闭环来实现的。信息和控制作用的传递是单向的,称为顺馈控制,不构成闭合环的,称为开环。

一个动态系统,其行为变化由“外部”(输入变量)所激励,并向“外部”(输出变量)提供其行为变化的某些特征。输入变量又可细分为“控制量”和“外扰”,而输出变量又可分为“被调量”和“测量量”,这两种量常常有重叠部分。

1.2 动力学系统

自然界存在输入输出关系完全不同的两类系统。一类系统是只要知道了输入信息,便可立即获得输出信息,即输入输出关系是一个代数方程。电阻电路属于这一类系统,只要输入电压确定,其输出电流便可确定。另一类系统则不然,给出了输入信息,还不能确

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com · 苑